

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky**

Parní generátor vodorovný VVER 1200 a VVER 1500

Horizontal Steam Generators VVER 1200 and VVER 1500

Student:

Tomasz Cieslar

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2010

Zadání bakalářské práce

Student: **Tomasz Cieslar**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R004 Provoz a řízení v energetice
Téma: **Parní generátor vodorovný VVER 1200 a VVER 1500**
Horizontal Steam Generators VVER 1200 and VVER 1500

Zásady pro vypracování:

Na základě rešerže literatury popište koncepci vodorovných parních generátorů pro VVER 1200 a VVER 1500, u jaderných elektráren III+ generace.

Proveďte zjednodušený tepelný výpočet pro čtyřsmyčkové uspořádání primárního okruhu.

Tepelný výkon jaderné elektrárny	4350 MWt
Tlak syté páry	7,8 MPa
Teplota chladiva v I. okruhu	298,5/330,7 °C
Tlak v I. okruhu	16,2 MPa
Parní výkon	8840 t/h

Seznam doporučené odborné literatury:

RÉDR, M., PŘÍHODA, M. *Základy tepelné techniky*. Praha. SNTL, 1991

ISBN 80-03-00366-0

SADIK, KAKAC. *Boilers, evaporators, condensers*. John Wiley. USA. New York 1991


CIP 90-22486 v knihovně VŠB.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010


prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 20. 5. 2010

Cieslan Tomáš
.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/200Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20. 5. 2010

Cieslar Tomasz
.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:
Adresa trvalého pobytu autora práce:

Tomasz Cieslar
Erbenova 800, Třinec, 739 61

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

CIESLAR, T.: *Parní generátor vodorovný VVER 1 200 a VVER 1 500.*

Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2010, 46 s. Bakalářská práce, vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Tato bakalářská práce se zabývá parními generátory VVER 1 200 a VVER 1 500. V úvodu práce jsou uvedeny teoretické informace o principu fungování, provozních okruzích, typech a generacích reaktorů v jaderných elektrárnách. Druhá část je věnována parním generátorům. Popisuje jejich rozdělení a princip fungování. Cílem této bakalářské práce je na základě provedených výpočtů, teoretické porovnání technických parametrů obou typů generátorů.

Klíčová slova:

jaderný reaktor, parní generátor, primární a sekundární okruh, tepelný výpočet

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

CIESLAR, T.: *Horizontal Steam Generators VVER 1 200 and VVER 1 500.*

Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2010, 46 p. Bachelor Thesis, Thesis supervisor: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

This bachelor thesis deals with steam generators VVER 1200 and 1500. The initial part contains theoretical information about running the plant, its circuits, types and generations of reactors in nuclear plants. The second part of the thesis is devoted to steam generators. It describes their types and functioning. The main purpose of the thesis is theoretical comparison of technical parameters of both types of generators.

KEY WORDS:

Nuclear reactor, Steam generator, Primary and secondary circuit, Heat calculation

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	07
SLOVNÍK ODBORNÝCH TERMÍNŮ	09
1. ÚVOD	11
2. JADERNÉ ELEKTRÁRNY	12
2.1 Princip jaderných elektráren	12
2.2 Typy jaderných elektráren	14
2.3 Okruhy v jaderných elektrárnách	18
3. PARNÍ GENERÁTORY	22
3.1 Princip parních generátorů	22
3.2 Rozdělení parních generátorů	25
3.3 Parní generátory pro VVER 1 200 a VVER 1 500	26
3.4 Tepelný výpočet parního generátoru pro VVER 1 500	30
3.5 Shrnutí a porovnání dosažených výsledků	41
4. ZÁVĚR	45
5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	48
6. PŘÍLOHY	

Seznam použitých značek a symbolů

A	[1]	konstanta
G	[kg.s ⁻¹]	parní výkon PG
Gr	[1]	Grashofovo kritérium
L	[m]	délka
L _{tr}	[m]	délka střední trubky
L _{trC}	[m]	celková délka trubek PG
Nu	[1]	Nusseltovo číslo, kritérium
P	[kg.h ⁻¹]	množství páry
Pe	[1]	Pecletovo číslo
Pr _{L.}	[1]	Prandtlovo číslo
Pr _{L.St}	[1]	Prandtlovo číslo při střední teplotě stěny trubky
Re	[1]	Reynoldsovo kritérium
S	[m ²]	celková teplosměnná plocha
S _{LC}	[m ²]	skutečná celková průtočná plocha
S _{LC(t)}	[m ²]	celková teoretická průtočná plocha I. média
S _{tr}	[m ²]	průtočná plocha jedné trubky
T _{trSt(t)}	[°C]	teoretická střední teplota stěny trubky
Q	[kW]	teplený výkon
Q _{PGsk}	[kW]	skutečný tepelný výkon PG
d ₁	[mm]	vnitřní průměr trubky
d ₂	[mm]	vnější průměr trubky
i _{L.1}	[kJ.kg ⁻¹]	entalpie primárního média – vstup
i _{L.2}	[kJ.kg ⁻¹]	entalpie primárního média – výstup
i _{NV}	[kJ.kg ⁻¹]	entalpie napájecí vody
i'	[kJ.kg ⁻¹]	entalpie syté vody
i''	[kJ.kg ⁻¹]	entalpie syté páry
k	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	součinitel prostupu tepla mezi teplotonositelem a parovodní směsí
l _v	[kJ.kg ⁻¹]	výparné teplo vody
m _L	[kg.s ⁻¹]	průtok I. média
n _{tr(t)}	[1]	teoretický celkový počet trubek
n _{tr}	[1]	skutečný celkový počet trubek
q _{st}	[W.m ⁻²]	měrný střední tepelný tok stěnou
t _{trI.}	[°C]	povrchová teplota stěny trubky na straně I. média
t _{trII.}	[°C]	povrchová teplota stěny trubky na straně II. média
t _{trSt}	[°C]	střední teplota stěny trubky
Δt	[°C]	teplotní rozdíl
Δt ₁	[°C]	teplotní rozdíl mezi vstupujícím I. médiem a II. médiem
Δt ₂	[°C]	teplotní rozdíl mezi vystupujícím I. médiem a II. médiem
Δt _{ln}	[°C]	střední logaritmický teplotní spád

$v_{I.St}$	$[m^3.kg^{-1}]$	měrný objem
$w_{I.(t)}$	$[m.s^{-1}]$	střední rychlost proudění primárního média
w_I	$[m.s^{-1}]$	skutečná střední rychlost proudění I. média při jeho střední teplotě
α	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$	součinitel přestupu tepla
α_I	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$	součinitel přestupu tepla na straně primárního média
α_{II}	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$	součinitel přestupu tepla na straně sekundárního média
$\eta_{I.St}$	$[kg.m^{-1}.s^{-1}]$	dynamická viskozita
λ	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti média
$\lambda_{I.St}$	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti stěny
$\nu_{I.St}$	$[m^2.s^{-1}]$	kinematická viskozita
ρ	$[kg.m^{-3}]$	měrná hustota
$\rho_{I.St}$	$[kg.m^{-3}]$	měrná hustota, střední

Slovník odborných termínů

BN	typ reaktoru na rychlých neutronech sovětského (ruského) projektového řešení)
BWR	typ varného reaktoru
Čerstvé jaderné palivo	nové (neozářené) palivo
Energetický blok	reaktor s turbínou a generátorem
Energetický reaktor	jaderný reaktor určený pro výrobu elektrické energie
FBR	typ rychlého množinového reaktoru
GCR	typ plynem chlazeného reaktoru
HWR	typ těžkovodního reaktoru (včetně CANDU)
INES	mezinárodní stupnice jaderných událostí, zavedená pro hodnocení jejich závažnosti, má osm úrovní (nulovou plus sedm stupňů pro hodnocení událostí)
Jaderná fyzika	část fyziky, zahrnující výzkum struktury a vlastností atomových jader a jejich přeměny, procesy radioaktivního rozpadu a jaderných reakcí
Jaderný palivový cyklus (JTC)	souhrn způsobu dobývání a výroby paliva pro jaderné reaktory, jeho přípravy k užívání a opakovanému využití
Jaderný reaktor	zařízení, ve kterém se uskutečňuje řízená řetězová reakce, doprovázená vývinem energie
JE	jaderná elektrárna, průmyslové zařízení na výrobu elektrické energie
Lodní reaktor	jaderný reaktor sloužící pro pohon lodí
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii. Založena v roce 1957, centrála se nachází ve Vídni
(International Atomic Energy Agency, IAEA)	
MOX	palivo (odvozeno od MOX – Mixed Oxide Fuel) – smíšené palivo (jaderné palivo, skládající se ze dvou nebo více štěpných nuklidů, většinou uranu a plutonia)
OJT	ozářené jaderné palivo, po vyjmutí z reaktoru se dočasně umísťuje v bazénu chlazení v areálu JE, potom se buď transportuje na přepracování nebo na dlouhodobé uložení
PWR	typ tlakovodního reaktoru (západní verze)
Radiační bezpečnost	systém opatření, která zabezpečují ochranu personálu organizací v jaderném průmyslu a obyvatelstva od radiačních následků
Radioaktivita	vlastnost některých jader spontánně měnit v čase svoje nuklidové složení
(radioaktivní rozpad)	
RBMK	typ kanálových grafitových reaktorů sovětského (ruského) projektového řešení
Tvel	palivový článek, hermetická trubička, uvnitř které jsou umístěny palivové tabletky
TVS	palivový soubor. Skládá se ze svazku palivových článků, technologických kanálů systému řízení ochrany reaktoru (SUZ), distančních mřížek, koncové části a hlavice
UO₂ (oxid uraničitý)	chemická sloučenina, základ jaderného paliva, používá se jako prášek k výrobě palivových tabletek

Uran (Uranium, U)	chemický radioaktivní prvek (kov) a atomovým číslem 92
Uran 235	Přírodní izotop uranu a atomovou hmotností 235., jeho obsah v přírodním uranu představuje 0,715%, je to štěpný materiál
Uranový koncentrát	produkt získaný při hydro-metalurgickém zpracování uranové rudy a obsahující do 70 až 90% objemové hmotnosti uranu v podobě směsi oxidů
VVER	typ tlakovodních energetických reaktorů sovětského (ruského) projektového řešení, voda se v něm používá jako chladivo i moderátor
Výzkumný reaktor	jaderný reaktor, využívaný k provádění základního a podpůrného výzkumu a k výrobě radioizotopových materiálů

1 ÚVOD

Cesta k dnešnímu rozvoji jaderné energetiky byla dlouhá. Základy má někde před více než 2 000 lety, kdy řecký filosof Demokritos hlásal, že všechno se skládá z droboučných částic. [1] Ovšem to podstatné se událo až teprve v minulém století.

Začalo to hlubším poznání hmoty, pochopením stavby atomů a objevením přirozené radioaktivity. Rozbití atomového jádra a ovládnutí řetězové reakce pak znamenalo opravdový třesk - počátek nového atomového věku. Od té doby byla po dlouhých letech úmorné práce fyziků, chemiků, matematiků a skupin techniků a dělníků mnoha národností vyvinuta jaderná elektrárna. [1]

Úplně první reaktor byl spuštěn v USA, ten však sloužil prvotně k výrobě plutonia. První elektrárna byla postavena ve Velké Británii, i ta však nedodávala proud do sítě. První elektrárna, která dodávala proud do sítě, byla spuštěna až v roce 1954 v bývalém SSSR. Měla výkon 5000 kW, avšak po několika letech byla odstavena a sloužila pouze k výzkumným účelům. Od té doby prošla jaderná energetika dlouhým vývojem, v jehož průběhu dosáhla vysokého stupně technické dokonalosti a nahromadila mnoho zkušeností.[2]

Většina energie pochází z fosilních paliv - uhlí, ropy a zemního plynu. Jenže, i když se fosilní paliva řadí mezi obnovitelné zdroje, obnova trvá přinejmenším několik tisíc let. Díky postupnému mizení fosilních paliv se hledají další využitelné zdroje. Jako dobrá alternativa třetího tisíciletí se počítá s jadernou energií. Zvýšená poptávka po výrobě elektrické energie bude nejen u nás, ale i ve většině vyspělých zemí krytá energií vyrobenou v jaderných elektrárnách.

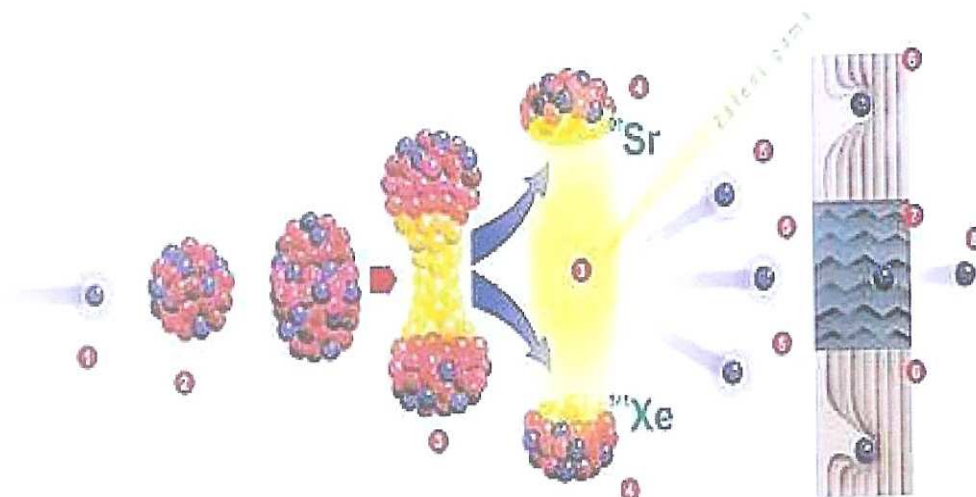
Současně budované jaderné elektrárny i elektrárny, s jejichž výstavbou se uvažuje v nejbližších letech u nás i ve východní Evropě, vyrábějí tepelnou energii v reaktorech typu VVER, které jsou moderovány i chlazeny vodou. Tyto lehkovodní reaktory vykazují velkou spolehlivost a bezpečnost, která je lety prověřena.

Jedním z nejdůležitějších funkčních celků v JE jsou parogenerátory, které patří do komplexu primárního okruhu a spojují primární a sekundární část JE. Samotný parní generátor je technický a provozně složitým a značně namáhaným systémem. Jeho chování při různých možných provozních a havarijních režimech vyžaduje zvýšenou pozornost. Parní generátor vodorovný VVER 1200 a 1500 - a jeho zjednodušený tepelný výpočet je hlavním tématem této bakalářské práce a budu se mu věnovat dále v samostatné kapitole.

2 JADERNÉ ELEKTRÁRNY

2.1 Princip jaderných elektráren

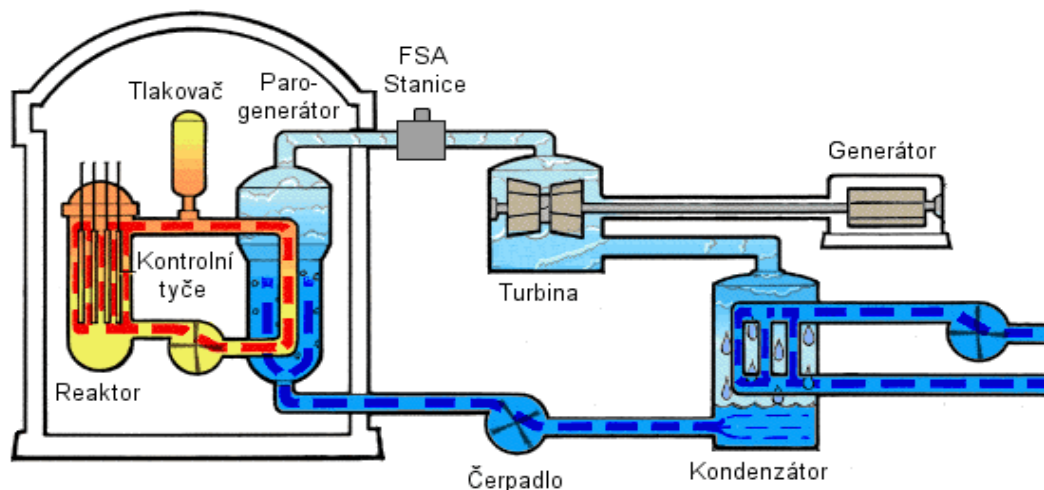
Jaderná elektrárna funguje na stejném principu jako elektrárna uhelná. U obou typů elektráren se energie vyrábí v generátoru poháněném parní turbínou. V uhelné elektrárně vzniká teplo k vytvoření páry spalováním uhlí. V jaderné elektrárně vzniká teplo řízenou reakcí při štěpení jader uranu. Současné jaderné elektrárny využívají jako palivo převážně obohacený uran, což je přírodní uran, v němž byl zvýšen obsah izotopu ^{235}U z původních zhruba 0,5 % na 2 – 5 %. [2,3]



Obr.: 2.1 Řízená štěpná reakce [2]

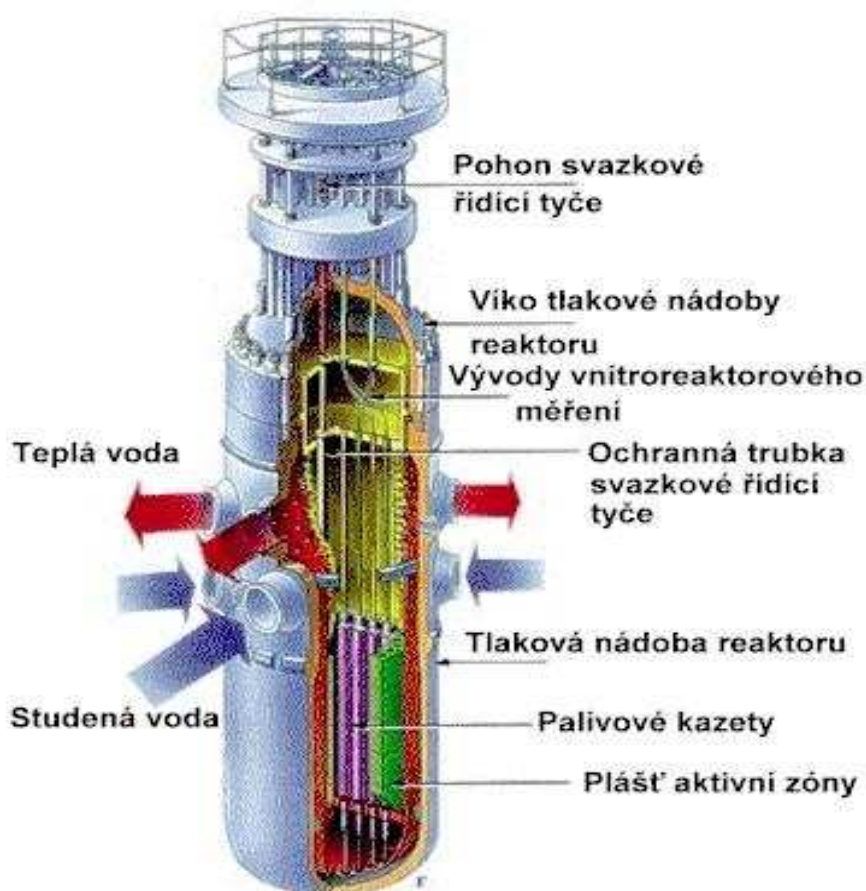
1. Pomalý neutron 2. Jádro uranu (^{235}U) 3. Štěpení 4. Dva odštěpky (štěpné produkty)
5. Rychlé neutrony 6. Absorbátor 7. Moderátor 8. Pomalý neutron

Ke zpomalování neutronů a současně k odvádění tepla se užívá nejčastěji obyčejná voda, která je pod zvýšeným tlakem (jako v papiňáku), aby se nevařila. Palivo má podobu tablet spečeného oxidu uranu, nastrkaných do plynotěsných kovových trubiček. Z těch jsou sestaveny palivové články, kolem nichž protéká chladicí voda primárního okruhu.



Obr.: 2.2 Schéma jaderné elektrárny [2]

V reaktoru dochází k řízenému štěpení jader uranu. Při štěpné reakci se uvolňuje velké množství tepelné energie. Voda primárního okruhu odevzdává v tepelném výměníku teplo vodě sekundárního okruhu, která odchází jako pára a pohání turbínu. Celý primární okruh je uzavřen do pevné a těsné železobetonové slupky. Jakákoli netěsnost palivových článků může znamenat uvolnění radioaktivních látek do primárního okruhu. Tam jsou však rychle zjištěny a hlavně neohrožují vnější okolí, do kterého zasahuje pouze sekundární okruh. Přidá-li se porucha těsnosti primárního okruhu, zafunguje slupka. Betonová slupka současně chrání reaktor před nebezpečími zvenčí, např. před pádem letadla. [3]



Obr.: 2.3 Schéma jaderného reaktoru typu VVER [2]

2.2 Typy a generace jaderných elektráren

Typy jaderných reaktorů

Reaktory můžeme dělit podle několika hledisek. [4]

Podle počtu chladících okruhů dělíme reaktory na:

- **jednookruhové**, kde probíhá výroba páry, popř. ohřev helia pro plynovou turbínu přímo v aktivním prostoru reaktoru
- **více-okruhové**, kde se teplo z reaktoru předává sekundárnímu okruhu. Někdy se mezi tyto dva okruhy vkládá z bezpečnostních důvodů ještě další okruh (např.) v případě chlazení tekutým sodíkem nebo roztavenými solemi.

Podle neutronového spektra reaktory dělíme na :

- **tepelné**, kde štěpení těžkých prvků způsobují tepelné neutrony s energií $\sim 0,025$ eV. Ty mají v aktivní zóně moderátor, který snižuje kinetickou energii neutronů na úroveň nejvyšší pravděpodobností štěpení. U **rychlých** reaktorů vyvolávají štěpení rychlé, nezpomalené.

Podle druhu moderátoru:

- **lehkovodní**, moderované lehkou vodou (H_2O)
- **těžkovodní**, moderované D_2O
- **grafitové**

Podle druhu použitého chladiva na reaktory:

- **chlazené plynem**, většinou oxidem uhličitým nebo heliem,
- **chlazené vodou**, lehkou nebo těžkou,
- **chlazené organickými látkami**, kde jsou chladivem polyfenyly
- **chlazené tekutým kovem**, nejčastěji sodíkem, ale možno také olovem a dalšími kovy.

Podle toho, zda-li dochází v aktivní zóně reaktoru k varu chladiva, můžeme reaktory rozlišovat na:

- **varné**
- **tlakovodní**

Podle IAEA můžeme dnes používané reaktory rozdělit podle následující tabulky:

Typ reaktoru	Moderátor	Chlazení	Označení
Tepelný	Lehká voda	H_2O	Tlakovodní (PWR)
			Varné (BWR)
	Grafit	CO_2	Plynem chlazené (GCR) a zdokonalené (AGR)
		He	Vysokoteplotní (HTGR)
		H_2O	Vodou chlazený (LWGR)
	Těžká voda	D_2O	Těžkovodní CANDU (PHWR)
		H_2O	Těžkovodní, chlazený obyčejnou vodou (HWLWR)
		CO_2	Těžkovodní, chlazený plynem (HWGCR)
Rychlý	Bez moderátoru	Na	Rychlý množinový (FBR)

Tab.: 2.1 Základní rozdělení reaktorů [4]

Generace reaktorů

Generace I

Prototypy komerčních reaktorů z 50. a 60. let, které již dnes nejsou v provozu.

Generace II

Éra začala v 70. letech minulého století velkými komerčními elektrárnami. Reaktory postavené v 70. a 80. letech nyní tvoří páteř jaderné energetiky.

Generace III a III+

Někdy označované jako “pokročilé tlakovodní reaktory a pokročilé varné reaktory“, vznikají od 90. let minulého století s množstvím evolučních prvků, které nabízejí významný pokrok z hlediska bezpečnosti a ekonomiky. Vyznačují se zvýšenou bezpečností a spolehlivostí zařízení. K důležitým parametrům patří nižší investiční náklady, kratší doba výstavby, delší životnost, méně radioaktivního odpadu a celkově vyšší efektivnost provozu. Několik jich bylo postaveno zejména ve východní Asii a od roku 1996 fungují například v Japonsku. Do této kategorie spadá i nový tlakovodní reaktor EPR budovaný ve Finsku. Ve Spojených státech získal licenci reaktor AP-600 od Westinghouse Company, ale žádná nová elektrárna se zde zatím nestaví.

Generace III+ :

S uvedením do provozu se počítá kolem roku 2010, zatím prochází vývojem nebo jsou ve schvalovacím řízení u regulátorů. Patří sem především reaktory s kuličkovým keramickým palivem PBMR (s výstavbou počítá Čína), americký AP1000 a IRI od firmy Westinghouse, ABWR a ESBWR od GE, GT-MHR, a také evropský SWR 1000. Všechny reaktory postavené do roku 2030 budou vybrány z této generace.

Také v souvislosti s dostavbou JE Temelín se hovoří právě o těchto typech lehkvodních reaktorů. Každý z nich se vyznačuje charakteristickými rysy.

Ruský typ VVER III. generace:

- bezpečnostní systémy určené ke zmírnění následků těžkých havárií
- JE 91/99 s VVER 1000 V428 a V466 – projekt ve spolupráci s Finy, v současnosti realizace v Číně, digitální systém kontroly a řízení, vyšší počet regulačních tyčí, vyhořívající absorbátor, záložní aktivní systém havarijního odstavení vstřikováním bóru, dvojitá plnotlaká ochranná obálka s aktivním chlazením a ventilovaným meziprostorem, 4 nezávislé separované trasy nouzového chlazení PO a odvodu zbytkového tepla, zesílení betonových konstrukcí uvnitř obálky, bazén pro vyhořelé palivo na 10let, lapač AZ nouzový systém zásobování napájecí vodou,
- JE92 s VVER 1000 V392 – příprava pokročilého projektu pro rok 2020, dva monobloky V392, cíle jsou ekonomika a zvýšení bezpečnosti, posílení odolnosti na selhání lidského faktoru, max. nezávislost obou bloků a další, aktivní a pasivní systém odvodu zbytkového tepla přes So, aktivní systém havarijního chlazení a pasivní systém zaplavení AZ (hydroakumulátory)

Americký BNFL/Westinghouse EP/AP 1000:

- konstrukce PČ a AZ čerpá a navazuje na skutečnosti Westinghousu
- dvousmyčková AP 1000 a třismyčková EP 1000 odvozeny z AP 600

- AP 1000 má maximum shodných prvků jako AP 600- určité snížení bezp. Rezerv
- Koncepce AP 600- zjednodušení všech systémů, pasivní bezpečnostní prvky, modulová koncepce, nouzové systémy chlazení a ochranná obálka automatizovány – po dobu 3 dnů těžké havárie nebude nutný zásah personálu, AZ s čtvercovou mříží, kampaň 18 měsíců, reaktivita řízená kyselinou boritou a malými sobory 12 řídících tyčí, reflektor z nerez a vody, PG vertikální, integrálně řešen se dvěma HCC, HCC se zapouzdřenými motory hermeticky uzavřená, setrvačnick z ochuzeného uranu, nouzové systémy o ochranná obálka a maximem pasivních bezpečnostních prvků, několik velkých nádrží s borovanou vodou, automatické snižování tlaku na PO, chlazení vnějšího povrchu ocelové ochranné obálky přirozenou konvekcí vzduchu
- AP 1000 – prodloužení AZ a přidání palivových článků, součinitel pohotovosti 93%, méně než 1 neplánovaný výpadek za rok, není nutná odstávka ani při ztrátě 100% zatížení, životnost 60 let bez výměny nádoby, ostatní je možno vyměnit, bórová regulace a vyhořívající absorbátor uvnitř AZ, aktivní systémy projektovány téměř výhradně pro normální provoz, k iniciaci pasivních systémů je nutný fungující systém kontroly a řízení
- EP 1000 – pro potřeby evropského trhu, třismyčkový, větší průměr reaktorové nádoby než AP 1000 a vyšší refundace bezpečnostních systémů, dva menší hydroakumulátory, odvod tepla na základě přirozené cirkulace do vnitřního bazénu výměny paliva

Evropský(francouzský)EPR:

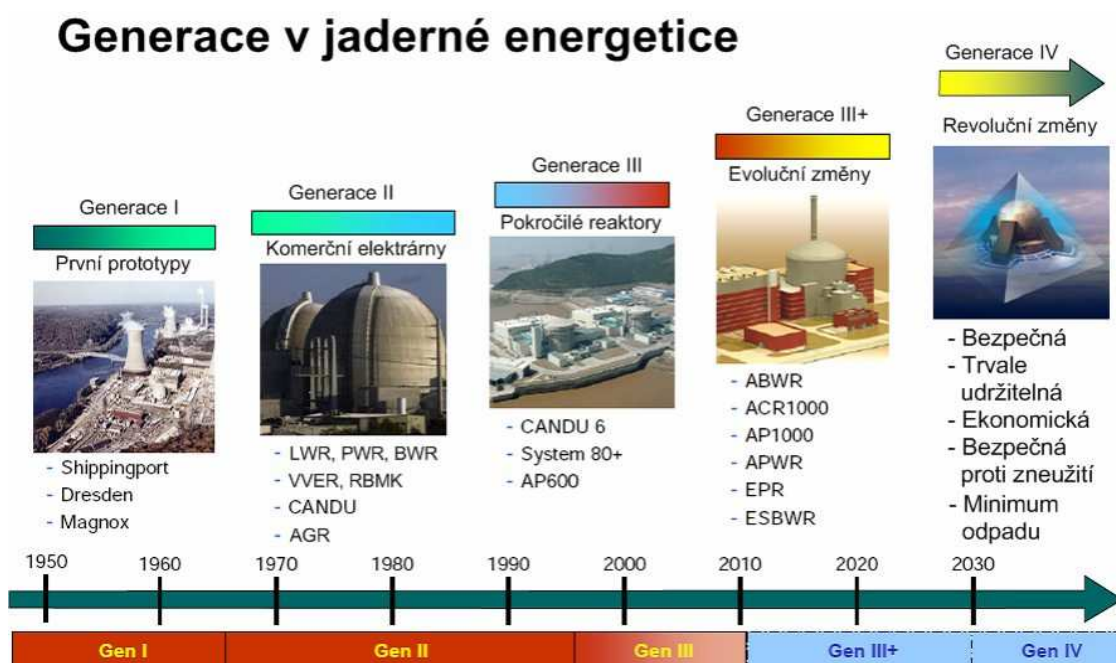
- Projekt evropského tlakovodního reaktoru od r. 1991 Framatom
- Z koncepce francouzské N4 a německé APWR konvoj
- Realizován v rámci 5. Bloku ve Finsku
- Výkon 1 500- 1 750 MWe, součinitel využití 87%, životnost 60 let, vyhoření 60 GWd/t, kampaň 12-24 měsíců, využití MOX, odstávka na výměnu paliva 19 dní/rok, separace systémů do 4 nezávislých tras
- AZ-241 palivových článků, obohacení do 5% MOX-část vyhořívající absorbátor Gd₂O₃, vyhoření 60 MWd/t, tepelný výkon 4270MWt, reaktivita dlouhodobě řízena kyselinou boritou, intenzita neutronového toku aktivací kuliček
- Reaktorová nádoba na 60 let, hrdla v max. možné výšce na AZ, dvojitá vrstva nízkouhlíkové nerez oceli na vnitřní stěně
- Vnitřoreaktorové komponenty- koš AZ zavěšený na přírubě tlakové nádoby, těžký reflektor, chladící voda proudí do každé kazety 4 otvory, kazety přímo na nosné desce
- PO – 4 smyčky (vertikální PG, oběhové čerpadlo), základní komponenty zvětšeny, kompenzátor objemu konvenční konstrukce zvětšený, sprchové systémy do větví
- Pomocné systémy – kontinuální čištění a doplňování chladiva i odplynovací funkci, má tři různá čerpadla, z nichž běží vždy jen jedno (nutná refundace)

- Stavební konstrukce- osvědčený koncept, kontejnment obklopen ochrannými a pomocnými budovami, zesílení budov s ohledem na zemětřesení a výbuch, 4 násobná refundace některých systému, některé budovy jako bunkry
- Ochranná obálka – podtlaková dvouplášťová, tavení AZ zahrnuto do projektové fáze, schopnost kontejnmentu vzdorovat účinkům vysokotlaké havarijní sekvence s tavením paliva, velká nádrž vody ve spodní části primárního kontejnmentu – nouzové dochlazování taveniny, vnější bunkr chrání proti vnějším vlivům, pasivní odvod tepla
- Lapač roztavené AZ- na pasivních principech, spojen kanálem a zátkou s vnitřním bazénem výměny paliva
- Bezpečnostní systémy – ve 4 nezávislých divizích s jednoduchým a přímým přístupem, 50% symetrie, systém nouzového zaplavení tlumící LOCA havárie a zajišťující odvod zbytkového tepla, středotlaký doplňovací systém dodává chladivo do studené větve systému chlazení reaktoru, může být použit pro vstřikování roztoku kyseliny borité při haváriích, zásobní vody pro výměnu paliva uvnitř kontejnmentu jako zdroj vody pro nouzové chlazení AZ, nouzový systém napájení generátorů, systém odvodu zbytkového tepla

Do této kategorie patří ještě varné reaktory typu ABWR - projekty: SWR-1000, EABWR, ESBWR, HC BWR

Generace IV

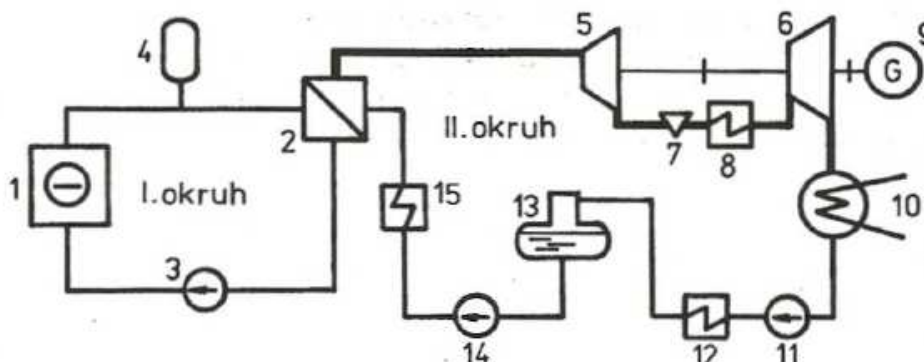
Plán na jejich využití je rozvržen až do roku 2030, kdy životnost mnoha dnes provozovaných reaktorů bude u konce. Místo tradiční vody bude většina využívat k chlazení látky, umožňující provoz s mnohem vyšší teplotou, a tím i účinností. [5]



Obr.:2.3 Připomenutí jednotlivých generací jaderných reaktorů.
Upravený obrázek z materiálu organizace „Gen IV International Forum“ [6]

2.3 Okruhy v jaderných elektrárnách

Většina jaderných elektráren má dva hlavní okruhy: **I. primární** a **II. sekundární**.



Obr.: 2.4 Tepelné schéma dvouokruhové jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem [3]

1. reaktor 2. parní generátor 3. hlavní cirkulační čerpadlo 4. kompenzátor objemu
5. a 6. vysokotlaká a nízkotlaká část parní turbíny 7. odlučovák vlhkosti 8. a 9. elektrický generátor
10. kondenzátor 11. kondenzátní čerpadlo 12. nízkotlaké regenerační ohříváky napájecí vody
13. odlpyňovák s napájecí nádrží 14. napájecí čerpadlo 15. vysokotlaký regenerační ohřívák napájecí vody

Primárním okruhem (aktivním, prvním) elektráren je nazýván soubor zařízení, jejichž úkolem je řídit štěpnou řetězovou reakci, odvádět teplo při ní vznikající k jeho dalšímu využití a zajistit plynulost a bezpečnost tohoto procesu.

Srdcem primárního okruhu je jaderný **reaktor**. Dále primární okruh tvoří:

- **potrubní systémy k cirkulaci vody**
- **parogenerátor**
- **kompenzátor objemu**
- **cirkulační čerpadlo**
- **bezpečnostní a havarijní systémy.** Jedná se o uzavřený systém, který brání úniku radioaktivity vně tohoto systému.

Parogenerátor - uvnitř vzniká pára pohánějící parní turbínu, rozděluje chladicí smyčku na horkou větev, jíž proudí voda ve směru z reaktoru do parogenerátoru a studenou větev, kterou se voda vrací zpět do reaktoru.

Hlavní cirkulační čerpadlo - zajišťuje cirkulaci vody ve smyčce, je umístěno na její studené větvi.

Kompenzátor objemu - reguluje tlak v primárním okruhu a udržuje jej na stanovené hodnotě. Kompenzátor objemu je v primárním okruhu jeden a je napojen na potrubí jedné ze čtyř hlavních cirkulačních smyček.

Havarijní systémy - jsou připraveny zasáhnout, pokud by v primárním okruhu došlo k neplánované změně provozních parametrů nebo poruše. Některé z havarijních systémů se, ovšem používají i při plánovaných změnách chodu reaktoru, například při jeho odstavování před výměnou paliva.

Celý primární okruh i se všemi bezpečnostními a pomocnými zařízeními je neprodyšně uzavřen v železobetonové ochranné obálce - **kontejnmentu**. Ten chrání okolí elektrárny před následky případné havárie a chrání celý primární okruh před vnějšími vlivy. Těmto úkolům odpovídá i mohutná konstrukce kontejnmentu. Fyzikální podmínky, které v primárním okruhu panují (vysoká teplota a tlak vody a pronikavá radiace), kladou vysoké nároky na materiál a kvalitu provedení jednotlivých zařízení. Při jejich výrobě se používají převážně speciální, korozivzdorné oceli.

Součástí primárního okruhu je také rozsáhlý elektronický monitorovací systém, který nepřetržitě sleduje provozní a bezpečnostní parametry všech zařízení primárního okruhu a o jejich hodnotách a stavu informuje operátory. [7]



Obr.: 2.5 Schéma jaderné elektrárny [3]

Sekundárním okruhem (neaktivním, druhým) elektráren je nazýván soubor zařízení, který slouží k transportu páry a přeměně její nitřní energie na točivý pohyb turbíny.

Základní části sekundárního okruhu tvoří:

- **sekundární část parogenerátoru**
- **porubní systémy sekundárního okruhu**
- **turbogenerátor**
- **kondenzátor**
- **čerpadla**

Turbína a generátor jsou spolu pevně propojeny a tvoří tzv. **turbogenerátor**. Turbína je složité soustrojí, které se skládá ze dvou hlavních částí:

- vysokotlakého dílu
- a
- tří nízkotlakých dílů

Pára, která vzniká v parogenerátorech, je nejprve vedena do vysokotlakého dílu turbíny, kde expanduje a působením na lopatky oběžných kol roztáčí turbínu. Při expanzi se teplota a tlak páry snižují, ale jsou ještě dostatečné k tomu, aby pára roztáčela oběžná kola tří nízkotlakých dílů turbíny, kam je pára z vysokotlakého dílu po vysušení a ohřátí přiváděna. Konstrukce oběžných kol obou dílů je přizpůsobena účelu turbíny – maximálně využít energii expandující páry. Proto jsou jejich rozměry a tvar odlišné. V zásadě platí, že čím více tlak páry klesá, tím jsou oběžná kola větší.

Nejsložitějším zařízením sekundárního okruhu a z hlediska strojního a elektrotechnického i nejsložitějším zařízením celé elektrárny je generátor. Ten přeměňuje pohybovou energii točící se turbíny na energii elektrickou. Rotor generátoru je pevně spojen s turbínou. Je opatřen budícím vinutím, jehož pomocí se indikuje magnetické pole. Výsledný produkt celé elektrárny – elektrický proud vzniká ve vinutích statoru generátoru. Cyklus vody a páry v sekundárním okruhu je uzavřený. Pára je poté, co projde třemi nízkotlakými díly turbíny, odváděna do kondenzátorů, kde se chladí a sráží na kondenzát (kondenzuje na vodu). Po několika nezbytných úpravách (přečištění, ohřátí) se kondenzát stává tzv. napájecí vodou, která je potrubím přiváděna zpět do parogenerátorů, kde se vypaří. Z parogenerátorů pára znovu proudí do turbíny.

Chladicí okruh a chladicí věže je okruhem, ve kterém proudí chladicí voda

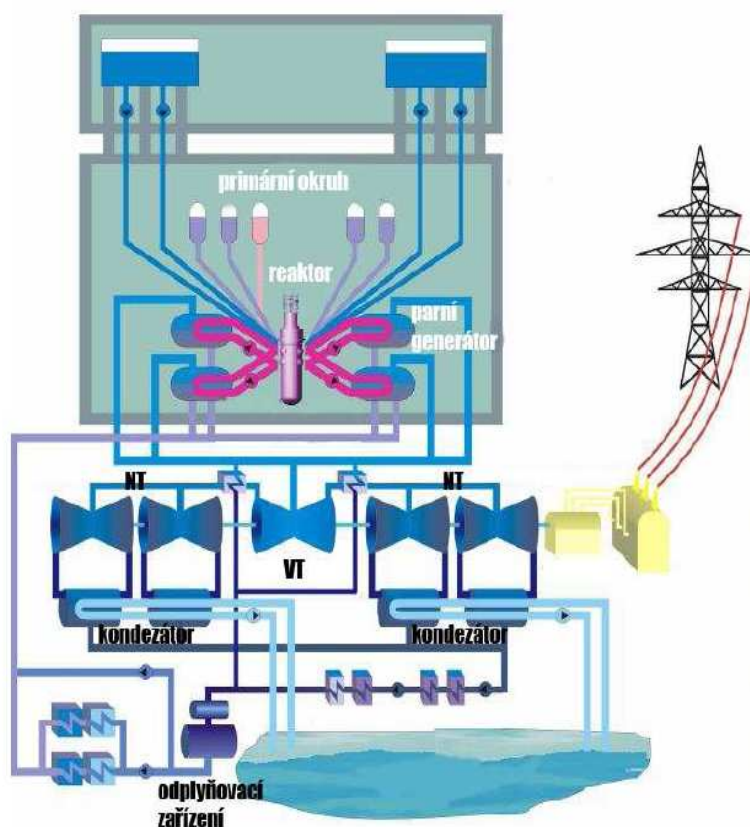
Ta v **kondenzátoru odebírá** teplo páře. V chladicích věžích se odparem v proudícím vzduchu ochlazuje voda chladicího (terciárního) okruhu. Do ovzduší z věže stoupá jen čistá vodní pára.

V sekundárním okruhu je pára z nízkotlakých dílů turbíny vedena do tří kondenzátorů, kde se sráží na vodu – kondenzuje. V kondenzátorech se tak hromadí dále nevyužitelná tepelná energie. Chladit tyto kondenzátory je úkolem hlavního chladicího okruhu elektrárny.

Voda, která kondenzátorům teplo odebírá, je odváděna do chladicích věží, kde je toto teplo rozptýleno do ovzduší.

Kondenzátor je vlastně velký výměník tepla, který se skládá z 32 000 tenkých trubek. Důvodem pro tak obrovské množství trubek je, stejně jako u parogenerátoru, snaha získat co největší plochu, na které by mohla pára přicházející z turbíny kondenzovat. Pára kondenzuje na povrchu trubek, uvnitř trubek protéká chladicí voda. [7]

Voda ochlazující trubky kondenzátorů je potrubím vedena do chladicích věží, největších a nejviditelnějších částí jaderné elektrárny. Chladicí věže, kterými uvnitř protéká velké množství obyčejné, neradioaktivní vody, jsou opět jen velkými tepelnými výměníky. Voda je ve věži vedena vzhůru a rozprašována na výplň uvnitř věže, tvořenou bloky z PVC. Zatímco voda zvolna protéká výplní, odspodu proudící studený vzduch ji ochlazuje. Voda z výplně volně stéká do sběrné nádrže, bazénu zabírajícího téměř celou plochu pod věží. Odtud voda vyspádováním kanály stéká k mohutným čerpadlům, která zajišťují její cirkulaci chladicím okruhem a která ji znovu dopraví do kondenzátorů. Při chlazení vody ve věžích se z ní část odpaří, část je ve formě drobných kapiček odnesena proudícím vzduchem. Proto je třeba vyčištěnou a chemicky upravenou vodu do chladicího okruhu neustále doplňovat. [7]



Obr.: 2.6 Schéma jaderné elektrárny s reaktorem VVER 1200 [13]

3 PARNÍ GENERÁTORY

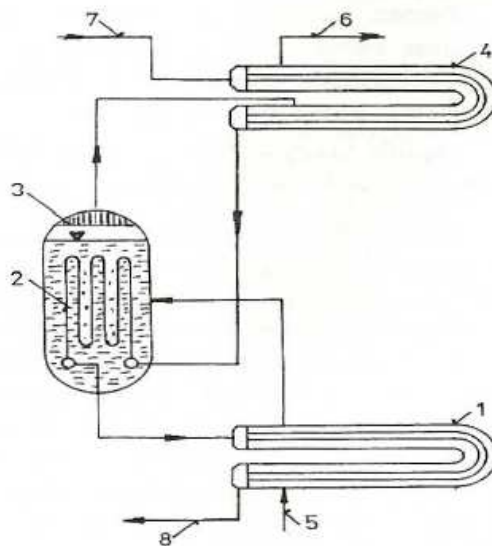
V jaderné elektrárně patří parní generátor (PG) k těm nejdůležitějším a největším výměníkům tepla. Nejpoužívanějším typem parních generátorů ve světě, je PG s tlakovodními reaktory. Používají se ve dvojím provedení:

- horizontální
- vertikální

Oba typy mají své výhody a nevýhody. PG je i významným bezpečnostním prvkem v elektrárnách typu VVER. Výhodou je, že odděluje sekundární okruh od aktivního, primárního okruhu, takže sekundární okruh je neaktivní a není tedy biologický stíněn. [8]

3.1 Princip parních generátorů (PG)

V elektrárnách s reaktory typu VVER se používají parní generátory horizontální. PG je horizontální válcová nádoba s ponornou teplosměnnou plochou z horizontálně uložených trubek se vstupním a výstupním kolektorem vody primárního okruhu, separačním zařízením, parním kolektorem a rozvodem napájecí a havarijní vody. Ukotvení PG je provedeno závěsy a lanovými omezovači. Těleso PG je pokryto snímatelnou tepelnou izolací. [8]



Obr.: 3.1 Hlavní součásti parního generátoru [8]

1. ekonomizér 2. výparník 3. separátor vlhkosti 4. přehřívák 5. přívod napájecí vody
6. odvod páry 7. přívod teplosměnného média 8. odvod teplosměnného média

Parní generátor je zařízení, ve kterém ohřáté chladivo primárního okruhu předává teplo získané v reaktoru vodě sekundárního okruhu a vyrábí sytou páru pro pohon parních turbín. **Parní generátory tak tvoří spojovací článek mezi primárním a sekundárním okruhem.**

Chladivo primárního okruhu přichází z horké větve cirkulační smyčky do vstupního kolektoru a přes výparník proudí do výstupního kolektoru a vrací se studenou větví cirkulační smyčky přes hlavní cirkulační čerpadlo do aktivní zóny. V trubkovém výparníku je teplo odevzdáno vodě sekundárního okruhu, která se nachází mezi trubkami. Cirkulace vody v PG je přirozená. Vzniklá pára odchází přes separátor a parní nátrubky do parního kolektoru, umístěného nad nádobou PG a dále je vedena k parní turbíně.

Pro dodržení chemického režimu vody sekundárního okruhu (koncentrace iontů chlóru a křemíku), se provádí trvalý odluh a periodický odkal parních generátorů. Odluh a odkal je organizovaný ze spodní části nádoby a odvádí se do systému dluhů parních generátorů. Napájení PG na sekundární straně je zabezpečeno normálním napájením a také super havarijním napájením. Těsnost spojů a trubek se zajišťuje rozborem radioaktivity odkalovací vody a páry. Těleso PG je převážně vyrobeno z uhlíkaté oceli, kolektory a trubky z nerezavějící oceli.

Parní generátory jsou umístěny v boxu parogenerátorů a jsou zavěšeny u stropu boxu. Jejich výškové uložení musí být takové, aby se vytvořila přirozená cirkulace chladiva po dobu dochlazování reaktoru bez činnosti hlavních cirkulačních čerpadel.[8]



Obr.: 3.2 Parní generátory v hermetických boxech [9]

Materiály pro parní generátory

Pro zajištění bezpečného a spolehlivého provozu zařízení je volba vhodného typu oceli, a to jak z hlediska konstituce, taktéž i z hlediska požadované úrovně fyzikálně a mechanicko - metalurgických vlastností, velmi důležitá. **Hlavním požadavkem** kladeným na ocel vhodnou pro stavbu parních generátoru je její dosažení potřebné **pevnostní úrovně za normální a zvýšené teploty a příslušná úroveň lomové houževnatosti při zabezpečení dobré svařitelnosti**. Pro stavbu parních generátorů jsou používány již osvědčené typy oceli - 22 K, 20 K a 08Ch18N10T. Pro teplotonosné trubky bývá volen materiál 08Ch18N10T (CSN 17 248) - nerezavějící austenitická niklchromovaná ocel, stabilizovaná titanem. Jedná se o materiál strukturně stabilní, který neuvolňuje korozní produkty, a tudíž se nezanášejí topné články. Austenitické materiály jsou ovšem dražší a jejich tepelná vodivost je nižší než u uhlíkových ocelí. Za přítomnosti iontu chloru a kyslíku a také při zvýšené alkalitě mají tyto materiály náchylnost ke korozi, což je nedostatek nejpodstatnější. Pro spolehlivou funkci trubek je tedy třeba mít vysoce upravenou vodu s nízkým obsahem iontu Cl a nízkou alkalitou. [8]



Obr.: 3.3 Uspořádání trubek uvnitř parního generátoru [13]

3.2 Rozdělení parních generátorů

Parní generátory dělíme z několika hledisek:

Parní generátory z hlediska proudění sekundární vody: [10]

- 1) parní generátory s přirozeným oběhem sekundární vody
- 2) parní generátory s nuceným oběhem sekundární vody
- 3) parní generátory s nuceným průtokem sekundární vody (parní generátory průtočné)

Parní generátory z hlediska polohy: [10,11,12]

1) parní generátory svislé:

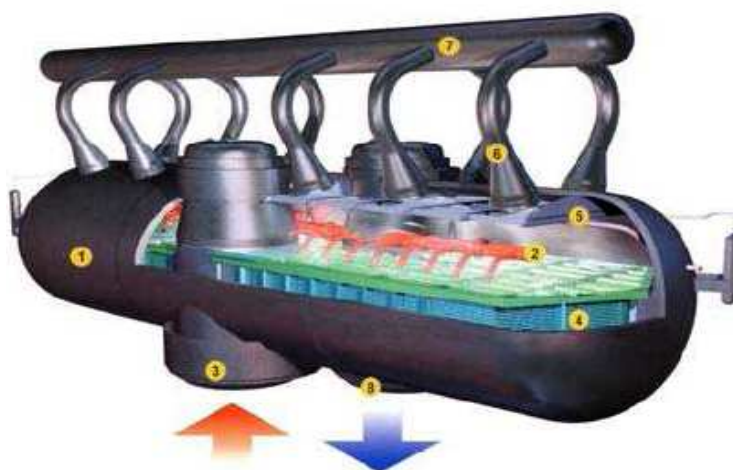
- a) svislý generátor v jaderné elektrárně
- b) svislý parní generátor s vyztuženou trubkovnicí
- c) svislý parní generátor se svislým kolektorem primární vody
- d) svislý průtočný parní generátor s přímými trubkami a mírným předeřevem páry
- e) svislý parní generátor Trépaud s přímými, mírně vlnitými trubkami

2) parní generátory vodorovné:

- a) parní generátor s tlakovodním reaktorem VVER 440
- b) parní generátor s tlakovodním reaktorem VVER 640
- c) parní generátor s tlakovodním reaktorem VVER 1 000
- d) parní generátor s tlakovodním reaktorem VVER 1 200 a 1 500 nové projekty

Parní generátory ostatní: [10]

- 1) parní generátory s varnými reaktory
- 2) pomocné parní generátory s varnými reaktory
- 3) parní generátory s plynem chlazenými reaktory
- 4) parní generátory s reaktory chlazenými tekutými kovy



Obr.:3.4 Schéma parního generátoru VVER 1000 [8]

1. Těleso parogenerátoru
2. Přívod napájecí vody
3. Přívod horké primární vody z reaktoru
4. Teplosměnné trubky
5. Separátor vlhkosti páry (děrovaný plech)
6. Sběrač páry
7. Parní kolektor
8. Odvod ochlazené primární vody z parogenerátoru

3.3 Parní generátory pro reaktory typu VVER 1200 a VVER 1500

Jde o parní generátory, které jsou v praxi jen krátce nebo teprve budou uváděny do provozu v nejbližších letech. Jedná se o nové typy, u kterých se konstrukčně vychází, z již existujících a léty prověřených typů VVER 1000. Tyto nové vylepšené parogenerátory mají garantovat zejména vyšší bezpečnost, zvýšený výkon, příznivější poměr nákladů k výkonu a prodlouženou životnost základního vybavení na dobu až 60 let. To znamená velké nároky na kvalitu konstrukčních prvků.

Parní generátor s tlakovodním reaktorem VVER 1200 (AES 2006)

Pro tento typ parního generátoru není dostatek tištěné literatury, proto jsem k tomuto tématu čerpal informace pouze z internetu. Tento typ parního generátoru je po konstrukční stránce totožný s parním generátorem pro reaktory VVER 1000. Liší se pouze v technických parametrech. Pro celkovou orientaci v tématu uvádím informace nejen k parnímu generátoru, ale k celému modelu reaktoru VVER 1200.

Níže uvedené informace jsou z publikovaného textu na internetu: [13]

Tento vývoj je založen na:

- Zkušeností v projektování, propočtech, experimentálním ověřováním u předchozích projektů: RP V-320, V-392, V-428, V-466, V-412;
- Dlouhodobé provozní zkušenosti s reaktorovými stanicemi, které využívají reaktory VVER-1000;
- Splnění požadavků EU na technické vybavení jaderných elektráren nového tisíciletí LWR;
- Doporučení IAEA ohledně bezpečnosti jaderných elektráren;
- Splnění technických požadavků koncernu „Rosenergoatom“ na jaderné elektrárny 2006 s typem reaktoru VVER o elektrickém výkonu minim. 1150 MW;
- Prognóze dalších požadavků potenciálních zákazníků mimo Ruskou Federaci.

Tab.: 3.1 Reaktorová nádoba

Parametr	Hodnota pro VVER -1200	Hodnota pro VVER-320
Délka, mm	11 185	10 897
Vnitřní průměr, mm	4 250	4150
Tloušťka stěny v pásnu aktivní zóny, mm	197,5	192,5
Hmotnost, t	330	320

Tab.: 3.2 Modernizovaný reaktor

Parametr	Hodnota pro VVER-1200	Hodnota pro V-42	Hodnota pro V-320
Nominální tlak při vstupu Z aktivní zóny, MPa	16,2	15,7	15,7
Teplota chladicí kapaliny při výstupu z aktivní zóny, °C	328,9 *	320	320
Teplota chladicí kapaliny u vstupu do aktivní zóny, °C	298,2	289,7	289,7
Průtoková rychlost chladicí kapaliny reaktorem, m ³ /h	86 000	86 000	84 00

*Hodnoty parametrů jsou upřesňovány v průběhu vývoje detailní zprávy o projektu

Tab.: 3.3 Hlavní parametry primárního okruhu

Parametr		
Počet primárních okruhů	ks	4
Průtok chladicí kapaliny reaktorem	m ³ /h	86 000
Tlak nasycené páry	MPa	7,0
Teplota chladicí kapaliny při vstupu do reaktoru	°C	298,6
Teplota chladicí kapaliny při výstupu z reaktoru	°C	329,7
Tlak chladicí kapaliny při výstupu z reaktoru	Mpa	16,2
Předpokládaný tlak chladicí kapaliny	MPa	17,64
Předpokládaná teplota chladicí kapaliny	°C	350

Tab.: 3.4 Parní generátor – hlavní parametry VVER 1200

Parametr	Hodnota pro VVER-1200	Hodnota pro V-428	Hodnota pro V-320
Typ parního generátoru	PGV-1000 MKP	PGV-100 M	PGV-1000 M
Vnitřní průměr nádoby parního generátoru, m	4,2	4,0	4,0

Počet trubek	ks	10 978
Povrch tepelné výměny	m ²	6 104,9
Kapacita páry	t/h	1 602
Tlak páry	MPa	7,0
Velikost trubek	mm	16x1,5
Uspořádání trubek		koridorové
Zásoba vody na sekundární straně	m ³	350

Parní generátor s tlakovodním reaktorem VVER 1500

Taktéž k tomuto typu parního generátoru není v tištěné literatuře dostatek informací. Informace jsem opět čerpal pouze z internetu. [14]

Parní generátor PGV-1500/1600 je tradičně horizontální. Typická konstrukce takových parních generátorů je u agregátů VVER dobře známa a má mnohačetné rozsáhlé zkušenosti. Opět vychází z typu VVER 1000.

Projekt parního generátoru pro VVER-1500 byl oproti **PGV-1000 vylepšen**

o následující nové prvky:

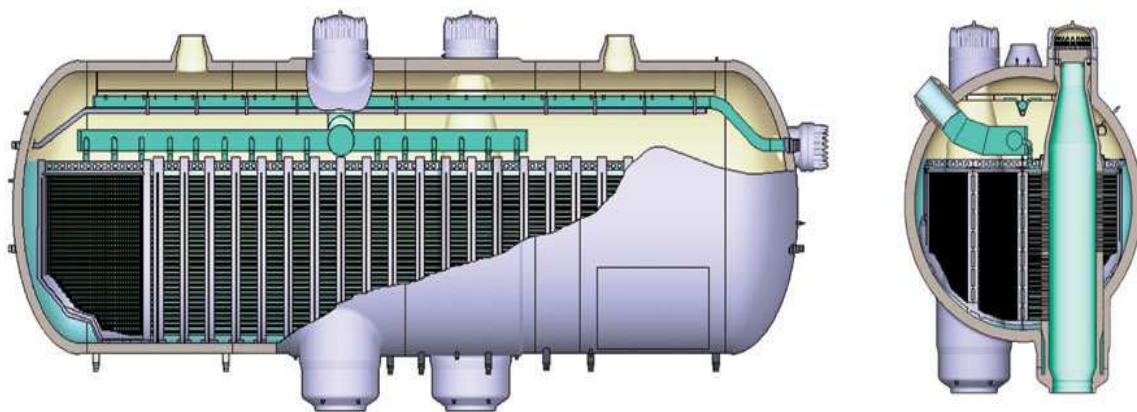
- „koridorové“ uspořádání svazku trubek
- začlenění přehřívací části
- zmenšení průměru trubek a jejich tloušťky atd.

Projekt jaderné elektrárny s reaktorem VVER-1500 v sobě spojuje pasivní a aktivní bezpečnostní systém, které vykonávají kritické bezpečnostní funkce.

U aktivních kanálů s 4 krát 100% strukturou tytéž komponenty slouží k normálnímu chodu provozu stejně tak jako k chodu bezpečnostnímu. Toto, mimo samotné využití, např. při kombinaci proudových a odstředivých čerpadel, podstatně zvýšilo spolehlivost zařízení pokud jde o bezpečnost a snížilo množství použitých komponentů, ventilů, trubek, přechodů, populašných zařízení, nástrojů, kabelů atd.

Tab.:3.5 Parní generátor – hlavní parametry VVER 1500

Parametr		
Počet primárních okruhů	ks	4
Průtok chladicí kapaliny reaktorem	m ³ /h	110760
Tlak nasycené páry	MPa	7,8
Teplota chladicí kapaliny při vstupu do reaktoru	°C	298,5
Teplota chladicí kapaliny při výstupu z reaktoru	°C	330,7
Tlak chladicí kapaliny při výstupu z reaktoru	Mpa	16,2
Předpokládaný tlak chladicí kapaliny	MPa	17,64
Předpokládaná teplota chladicí kapaliny	°C	350



Obr.:3.6 Parní generátor horizontální PGV-1500 [14]

Oba typy jsou tradičně horizontální. Liší se pouze v technických parametrech. Na výrobě komponentů pro typ VVER 1200, někdy také označované jako AES 2006 nebo MIR 1200 a také 120/491 mají zájem se podílet i naše české firmy. Ostravská firma Vítkovice, a.s. už provedla zkoušky u tří parogenerátorů v Rusku i u nás. Kromě standardních zkoušek byly tyto PG podrobeny i zkouškám na odolnost proti koroznímu praskání při pomalé deformaci. Všechny zkoušky vyšly a firma pro tento účel počítá s výrobou nové modifikace oceli 10GN2MFA.

Pro výstavbu 3. a 4. energobloku Jaderné elektrárny Temelín nabízí konsorcium firem ŠKODA JS a.s., Atomstrojexport a.s. a OKB Hidropress, a.s., projekt MIR-1200 (Modernized International Reactor) založený na projektu AES-2006. Jde o výsledek evolučního vývoje technologie s tlakovodními reaktory typu PWR. V současné době probíhá výstavba sedmi bloků VVER-1000/1200 v Rusku a pěti bloků JE v dalších zemích. Veškeré podstatné komponenty na výrobu páry lze vyrobit v ČR nebo na Slovensku. Reaktory V-491 ve ŠKODA JS, parogenerátory PGV-MKP a tlakové nádoby nejrůznějšího určení ve společnosti Vítkovice, potrubí a armatury v Modřanské potrubní, další zařízení v SES Tlmače, vzduchotechnika v ZVVZ Milevsko, systém kontroly a řízení v PPA Bratislava nebo v ZAT Příbram. Konsorcium je připraveno toto všechno nabídnout potenciálním zákazníkům i našim českým výrobcům.

3.4 Tepelný výpočet pro parní generátor VVER 1500

Výpočet jsem provedl na základě dostupné odborné literatury [15,16,17] a tabelované hodnoty jsem odečetl pomocí programu EES, rovnice jsem vytvořil editorem rovnic v programu Word.

Zadané parametry parního generátoru (dále jen PG):

Tepelný výkon PG	$Q_{PG}=1087,5$	[MW]
Tlak syté páry	$P_{II}=7,8$	[MPa]
Tlak v I. okruhu	$P_I=16,2$	[MPa]
Teplota média v I. okruhu - vstup	$t_{I,1}=330,7$	[°C]
Teplota média v I. okruhu – výstup	$t_{I,2}=298,5$	[°C]
Účinnost PG	$\eta_{PG}=99$	[%]

Střední teplota I. média:

Při výpočtech přestupu tepla z primárního média do stěny trubky uvažujeme jeho střední teplotu, tedy aritmetický průměr vstupní a výstupní teploty v daném počítaném úseku.

$$t_{I,St} = \frac{t_{I,1} + t_{I,2}}{2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1)$$
$$t_{I,St} = \frac{330,7 + 298,5}{2} = 314,6 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Hodnoty primárního média při jeho střední teplotě a tlaku 16,2 MPa :

Hustota	$\rho_{I,St}=695,90$	[kg.m ⁻³]
Měrný objem	$v_{I,St}=1,43 \cdot 10^{-3}$	[m ³ .kg ⁻¹]
Dynamická viskozita	$\eta_{I,St}=8,31 \cdot 10^{-5}$	[kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]
Kinematická viskozita	$\nu_{I,St}=1,194 \cdot 10^{-7}$	[m ² .s ⁻¹]
Prandtlovo číslo kritérium	$Pr_{I,St}=0,941$	[1]
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{I,St}=0,518$	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]

Entalpie primárního média:

Entalpie primárního média – vstup	$i_{I,1}=1519$	[kJ.kg ⁻¹]
Entalpie primárního média – výstup	$i_{I,2}=1328$	[kJ.kg ⁻¹]

Entalpie sekundárního média:

Entalpie napájecí vody (t = 220 °C)	$i_{NV}=943,$	[kJ.kg ⁻¹]
Entalpie syté vody	$i' = 1307$	[kJ.kg ⁻¹]
Entalpie syté páry	$i'' = 2762$	[kJ.kg ⁻¹]

3.4.1 Počet trubek a celková průtočná plocha primárního média

Teplosměnná plocha je tvořená trubky o rozměru $\varnothing 16 \times 1,5$ mm. Trubka má vnitřní průměr 13mm.

Celkový průtok primárního média, z něhož je odvozen potřebný počet trubek, je přímo úměrný tepelnému výkonu PG a nepřímo úměrný rozdílu vstupní a výstupní entalpie teplotnosné vody.

Zvolené parametry nutné pro další výpočty:

Střední rychlost proudění primárního média	$w_{L(t)} = 4,50$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
Vnitřní průměr trubky	$d_1 = 13$	$[\text{mm}]$
Vnější průměr trubky	$d_2 = 16$	$[\text{mm}]$

Průtok I. média:

$$\dot{m}_I = \frac{Q_{PG}}{(i_{I,1} - i_{I,2}) \cdot \eta_{PG}} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2)$$

$$\dot{m}_I = \frac{1087500}{(1519 - 1328) \cdot 0,99} = 5751,23 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Celková teoretická průtočná plocha I. média:

$$S_{I,C(t)} = \frac{\dot{m}_I}{w_{I(t)} \cdot \rho_{I,St}} \quad [\text{m}^2] \quad (3)$$

$$S_{I,C(t)} = \frac{5751,23}{4,50 \cdot 695,90} = 1,836 \quad [\text{m}^2]$$

Průtočná plocha jedné trubky:

$$S_{tr} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (4)$$

$$S_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,013^2}{4} = 1,33 \cdot 10^{-4} \quad [\text{m}^2]$$

Teoretický celkový počet trubek:

$$n_{tr(t)} = \frac{S_{I,C(t)}}{S_{tr}} \quad [1] \quad (5)$$

$$n_{tr(t)} = \frac{1,836}{0,000133} = 13800 \quad [1]$$

Skutečný celkový počet trubek:

Vypočtené potřebné množství trubek je navýšené o 10% z důvodu možného budoucího zaslepování zapříčiněného např. poškozením a zanášením trubek:

$$n_{tr} = n_{tr(t)} \cdot 1,1 \quad [1] \quad (6)$$

$$n_{tr} = 13800 \cdot 1,1 = 15\,180 \quad [1]$$

Skutečná celková průtočná plocha:

$$S_{I.C} = n_{tr} \cdot S_{tr} \quad [m^2] \quad (7)$$

$$S_{I.C} = 15180 \cdot 0,000133 = 2,018 \quad [m^2]$$

Skutečná střední rychlost proudění I. média při jeho střední teplotě:

$$w_{I.} = \frac{\dot{m}_{I.}}{S_{I.C} \cdot \rho_{I.st}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (8)$$

$$w_{I.} = \frac{5751,23}{2,018 \cdot 695,90} = 4,10 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Různé rychlosti proudící vody v trubkách jsou z důvodu jejich různých délek v jednotlivých sekcích. Vypočtená střední hodnoty rychlosti je tedy aritmetickým průměrem odlišných rychlostí pro celý PG.

3.4.2 Součinitel přestupu tepla mezi primárním médiem a vnitřní stěnou trubky

Součinitel přestupu tepla jsem určil na základě kritériálních rovnic, které se pro tepelnou konvekci upravují do tvaru: $Nu = f(Pe, Re, Gr)$

Nu = Nusseltovo kritérium

Pe = Pecletovo kritérium

Re = Reynoldsovo kritérium

Gr = Grashofovo kritérium

Vztahy pro výpočet jednotlivých kritérií byly určeny z teorie podobnosti. Tato podobnost v tepelné konvekci znamená podobnost teplotních polí a tepelných toků.

Při výpočtu Reynoldsova kritéria je třeba stanovit tzv. charakteristický rozměr, kterým je v mém případě vnitřní průměr trubky. Velikost Reynoldsova kritéria nám určuje, zda se jedná o proudění laminární ($Re < 2320$) či turbulentní ($Re > 10^4$), na čemž je závislý následný způsob výpočtu Nusseltova kritéria.

V Prandtlově čísle jsou obsaženy termofyzikální vlastnosti jako je:

kinematická viskozita, tepelná vodivost, měrné teplo

Fyzikální charakteristiky, které jsou obsaženy v jednotlivých kritériích podobnosti, jsou funkcí teploty. Při výpočtech je dodržována tzv. určovací teplota – aritmetický průměr teplot, které charakterizují přestup tepla prouděním.

Reynoldsovo číslo:

$$Re_{l,St} = \frac{w_{l,St} \cdot d_1}{\nu_{l,St}} \quad [1] \quad (9)$$

$$Re_{l,St} = \frac{4,10 \cdot 0,013}{1,194 \cdot 10^{-7}} = 445894,12 \quad [1]$$

Reynoldsovo číslo má hodnotu vyšší než 10^4 , v tom případě jde o proudění turbulentní.

Teplota syté páry při tlaku 7,8 MPa

Odečteno: $t_{II} = 293,2 \text{ °C}$

Teoretická střední teplota stěny trubky:

$$t_{trSt(t)} = \frac{t_{l,St} + t_{II}}{2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (10)$$

$$t_{trSt(t)} = \frac{314,6 + 293,2}{2} = 303,9 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Prandtlovo kritérium při střední teplotě trubky:

Pro výpočet Nusseltova kritéria jsem musel stanovit kritérium Prandtlovo Pr_{trSt} ,

Které odpovídá střední teplotě stěny trubky – tu jsem určil jako aritmetický průměr střední teploty primárního média a teploty sekundárního média.

Dále ve výpočtu jsem provedl kontrolní výpočet přesnosti této navržené střední teploty trubky. Odečteno: $Pr_{trSt} = 0,8892$ [1]

Nusseltovo kritérium:

Jelikož je hodnota Reynoldsova čísla vyšší než 10^4 a jedná se o podélné omývání, využiji vztahu:

$$Nu_{I.St} = 0,021 \cdot Re_{I.St}^{0,8} \cdot Pr_{I.St}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{I.St}}{Pr_{trSt}} \right)^{0,25} \quad [1] \quad (11)$$
$$Nu_{I.St} = 0,021 \cdot 445894,12^{0,8} \cdot 0,9407^{0,43} \cdot \left(\frac{0,9407}{0,8892} \right)^{0,25} = 685,96 \quad [1]$$

Součinitel přestupu tepla na straně primárního média:

$$\alpha_I = Nu_{I.St} \cdot \frac{\lambda_{I.St}}{d_1} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (12)$$
$$\alpha_I = 685,96 \cdot \frac{0,5179}{0,013} = 27327,59 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

3.4.3 Součinitel přestupu tepla mezi vnější stěnou trubky a sekundárním médiem

Výpočtová konstanta A.

Empirický vztah pro její určení jsem použil z literatury []

$$A = \frac{10,45}{3,3 - 0,0113 \cdot (t_{II} - 100)} \quad [1] \quad (13)$$
$$A = \frac{10,45}{3,3 - 0,0113 \cdot (293,2 - 100)} = 9,357 \quad [1]$$

Součinitel přestupu tepla na straně sekundárního média:

Chceme-li provést výpočet součinitele přestupu tepla mezi vnější stěnou trubky a parovodní směsí musíme znát hodnotu hustoty tepelného toku – tu je třeba odhadnout, a následně po výpočtech se posoudí míra správnosti odhadu. Toleranční mez činí 1%.

V případě, že odhad není dostatečně přesný, iterujeme hodnotu tepelného toku až do momentu, kdy se dosáhne požadované přesnosti.

Střední tepelný tok stěnou jsem určil iterační metodou: $q_{St(t)} = 98\,728 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

$$\alpha_{II.} = A \cdot q_{St(t)}^{0,7} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (14)$$

$$\alpha_{II.} = 9,357 \cdot 98728,49^{0,7} = 29325,56 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

3.4.4 Střední logaritmická teplota

Teplotní rozdíl mezi vstupujícím I. médiem a II. médiem:

$$\Delta t_1 = t_{I.1} - t_{II.} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (15)$$

$$\Delta t_1 = 330,7 - 293,2 = 37,5 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Teplotní rozdíl mezi vystupujícím I. médiem a II. médiem:

$$\Delta t_2 = t_{I.2} - t_{II.} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (16)$$

$$\Delta t_2 = 298,5 - 293,2 = 5,3 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

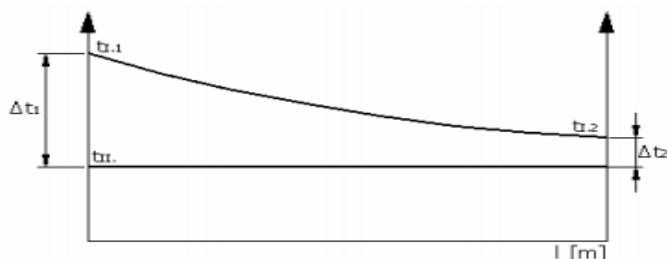
Střední logaritmický teplotní spád:

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (17)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{37,5 - 5,3}{\ln \frac{37,5}{5,3}} = 16,5 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Schéma znázornění průběhu teplot v primárním a sekundárním okruhu PG :

Horní křivka představuje průběh teploty primárního média po délce PG.
Dolní úsečka znázorňuje teplotu parovodní směsí v tělese PG.

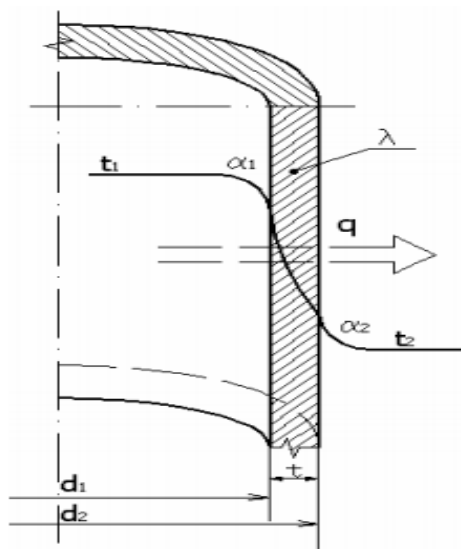


Obr.:31 Průběh teploty v primárním a sekundárním okruhu PG

3.4.5. Součinitel prostupu tepla

Pro teplosměnné trubky je zvolen materiál 08Ch18N10T, jehož součinitel tepelné vodivosti je: $\lambda_{tr} = 18,70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Prostup tepla probíhá postupně konvekcí na vnitřní ploše trubky, kondukcí stěnou trubky a tepelné vodivosti λ a tloušťce t a konvekcí na vnější ploše trubky. Přenos tepelného výkonu je omezován tepelnou bariérou představovanou odporem stěny trubky (obrácená hodnota tepelné vodivosti materiálu stěny) a tepelnými odpory k ní přilehlých přechodových pásem.



Obr.:3.2 Průběh teplot primárního média I. a II

Výsledný součinitel prostupu tepla mezi teplonositelem a parovodní směsí:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{I.}} \cdot \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2}{2 \cdot \lambda_{tr}} \cdot \frac{\ln d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_{II.}}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (18)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{27327,59} \cdot \frac{0,016}{0,013} + \frac{0,016}{2 \cdot 18,70} \cdot \ln \frac{0,016}{0,013} + \frac{1}{29325,56}} = 5953,54 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

Měrný střední tepelný tok stěnou:

Výpočet je kontrolou výše určené hodnoty (kapitola 3.5.3) hustoty tepelného toku, potřebné pro stanovení součinitele přestupu tepla. α_{II} .

$$q_{St} = k \cdot \Delta t_{ln} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (19)$$

$$q_{St} = 5953,54 \cdot 16,5 = 98233,45 \quad [W \cdot m^{-2}]$$

Relativní chyba volené hodnoty středního tepelného toku vzhledem k vypočtené hodnotě:

$$\Delta q_{rel} = \left| \frac{q_{St(t)} - q_{St}}{q_{St}} \right| \cdot 100 \quad [\%] \quad (20)$$

$$\Delta q_{rel} = \left| \frac{98728,49 - 98233,45}{98233,45} \right| \cdot 100 = 0,5 \quad [\%]$$

Odchylka je v mezích tolerance.

Kontrola navržené teploty stěny:

Teplo sdělené 1 m stěny trubky :

$$q_{lSt} = q_{St} \cdot d_2 \cdot \pi \quad [W \cdot m^{-1}] \quad (21)$$

$$q_{lSt} = 98233 \cdot 0,016 \cdot \pi = 4937,73 \quad [W \cdot m^{-1}]$$

Povrchová teplota stěny trubky na straně I. média:

$$t_{trI.} = t_{l.St} - \frac{q_{lSt}}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_{I.} \cdot d_1} \quad [^{\circ}C] \quad (22)$$

$$t_{trI.} = 314,6 - \frac{4937,73}{\pi} \cdot \frac{1}{27327,59 \cdot 0,013} = 310,18 \quad [^{\circ}C]$$

Povrchová teplota stěny trubky na straně II. média:

$$t_{trII.} = t_{II.} + \frac{q_{lSt}}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_{II.} \cdot d_2} \quad [^{\circ}C] \quad (23)$$

$$t_{trII.} = 293,2 + \frac{4937,73}{\pi} \cdot \frac{1}{29325,56 \cdot 0,016} = 296,55 \quad [^{\circ}C]$$

Střední teplota stěny trubky:

$$t_{trSt} = \frac{t_{trI.} + t_{trII.}}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (24)$$

$$t_{trSt} = \frac{310,18 + 296,55}{2} = 303,37 \quad [^{\circ}C]$$

Relativní chyba volené hodnoty střední teploty stěny trubky:

$$\Delta t_{trRel} = \left| \frac{t_{trSt(t)} - t_{trSt}}{t_{trSt}} \right| \cdot 100 \quad [\%] \quad (25)$$

$$\Delta t_{trRel} = \left| \frac{303,9 - 303,37}{303,37} \right| \cdot 100 = 0,17 \quad [\%]$$

Odklon je v mezích tolerance do 1%.

3.4.6. Velikost teplosměnné plochy a střední délka trubky

Dle celkového požadovaného tepelného výkonu PG a vypočtené měrné hodnoty tepelného toku, je stanovena potřebná teplosměnná plocha, z které je dále odvozená celková délka trubek.

Celková teplosměnná plocha:

$$S = \frac{Q_{PG}}{q_{st}} \quad [m^2] \quad (26)$$

$$S = \frac{1087,5 \cdot 10^6}{98233} = 11070 \quad [m^2]$$

Celková délka trubek PG :

$$L_{trC} = \frac{S}{\pi \cdot d_2} \quad [m] \quad (27)$$

$$L_{trC} = \frac{11070}{\pi \cdot 0,016} = 220230 \quad [m]$$

Délka střední trubky:

$$L_{tr} = \frac{L_{trC}}{n_{tr}} \quad [m] \quad (28)$$

$$L_{tr} = \frac{220230}{15180} = 14,50 \quad [m]$$



Obr.: 3.3 Teplosměnná plocha parního generátoru [13]

3.4.7 Parní a tepelný výkon PG

Výparné teplo vody:

$$l_v = i'' - i' \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$
$$l_v = 2762 - 1307 = 1455 \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$
(29)

Parní výkon PG při teplotě napájecí vody 220 °C:

$$G = \frac{Q_{PG}}{l_v + 1,01 \cdot (i' - i_{NV})} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$
(30)
$$G = \frac{1087500}{1455 + 1,01 \cdot (1307 - 943,50)} = 596,8 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Skutečný tepelný výkon:

$$Q_{PGsk} = G \cdot (i'' - i_{NV}) \quad [\text{kW}]$$
(31)
$$Q_{PGsk} = 596,8 \cdot (2762 - 943,50) = 1085280,8 \quad [\text{kW}]$$

Kontrola tepelného výkonu vypočteného vzhledem tepelnému výpočtu zadanému:

$$\Delta Q_{PGrel} = \left| \frac{Q_{PG} - Q_{PGsk}}{Q_{PGsk}} \right| \cdot 100 \quad [\%]$$
(32)
$$\Delta Q_{PGrel} = \left| \frac{1087500 - 1085280,8}{1085280,8} \right| \cdot 100 = 0,2 \quad [\%]$$

Odklon je v mezích tolerance do 1%.

3.5 Shrnutí a porovnání dosažených výsledků

Pro každý parní generátor jsou charakteristické tyto parametry:

Parní a tepelný výkon, vstupní a výstupní teplota a tlak primárního média, teplota a tlak sekundárního média a čistota páry. Tepelná účinnost udává tepelné ztráty do okolí. V zásadě nejsou velké. Měly by se pohybovat od 1 do 2 % tepelného výkonu.

Tato práce se zabývá zjednodušeným tepelným výpočtem horizontálního parního generátoru o tepelném výkonu 1 087,5 MW pro jaderný reaktor VVER 1500. Parní generátor je umístěn ve čtyřsmýčkovém uspořádání primárního okruhu bloku a vyrábí sytou páru o tlaku 16,2 MPa a teplotě 293 °C. Pro požadované energetické parametry byla vypočtena celková teplosměnná plocha 11 070 m², která je tvořena z 15 180 trubek tvaru „U“ o střední délce 14,5m. Podpěrný systém teplotnosných trubek zaručuje dostatečnou schopnost teplotních dilatací a zamezuje vibracím.

Primární médium o celkovém hmotnostním toku 5 751 kg/s sníží při průtoku trubkami parního generátoru svou teplotu o 32 °C, přičemž střední logaritmický teplotní spád mezi ním a sytou párou je 16,5 °C. Skutečná střední rychlost proudění primárního média je 4,10 m/s. Součinitel přestupu tepla na straně primárního média je 27 328 W/m².K¹.

Součinitel přestupu tepla na straně sekundárního média je 29 325 W/m².K¹.

Parní výkon činí 597 kg/s. a skutečný tepelný výkon je 1 085 MW.

Jako materiál pro teplosměnné trubky byla zvolena ocel: 08Ch18N10T.

Pro možnost porovnání s PG VVER 1200 jsem mimo tuto práci, provedl druhý výpočet. Hodnoty pro tento výpočet jsem zvolil sám podle uvážení a dostupných informací. Parní generátor je umístěn ve čtyřsmýčkovém uspořádání primárního okruhu bloku a vyrábí sytou páru o tlaku 16,2 MPa a teplotě 286 °C. Tepelný výkon 800 MW. Zadané i všechny vypočtené hodnoty jsou zapsány v níže uvedených tabulkách. Pro rychlejší orientaci a porovnání rozdílů, jsou některé charakteristické parametry v tabulkách zvýrazněny.

Tab.: 3.6 Zadané parametry PG

Název veličiny	Značka	Jednotka	PG VVER 1 500	PG VVER 1 200
Tepelný výkon PG	Q_{PG}	[MW]	1 087,5	800
Tlak syté páry	P_{II}	[MPa]	7,8	7,05
Tlak v I. okruhu	P_I	[MPa]	16,2	16,2
Teplota média v I. okruhu - vstup	$t_{I,1}$	[°C]	330,7	328
Teplota média v I. okruhu - výstup	$t_{I,2}$	[°C]	298,5	298
Účinnost PG	η_{PG}	[%]	99	99
Střední teplota I. média	$t_{I,St}$	[°C]	314,6	313

Tab.: 3.7 Hodnoty primárního média při jeho střední teplotě a tlaku 16,2 MPa

Název veličiny	Značka	Jednotka	PG VVER 1 500	PG VVER 1 200
Tlak	P	[MPa]	16,2	16,2
Hustota	$\rho_{I,St}$	[kg.m ⁻³]	695,9	699,7
Měrný objem	$v_{I,St}$	[m ³ .kg ⁻¹]	$1,43 \cdot 10^{-3}$	$1,43 \cdot 10^{-3}$
Dynamická viskozita	$\eta_{I,St}$	[kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]	$8,31 \cdot 10^{-5}$	$8,37 \cdot 10^{-5}$
Kinematická viskozita	$\nu_{I,St}$	[m ² .s ⁻¹]	$1,194 \cdot 10^{-7}$	$1,196 \cdot 10^{-7}$
Prandtlovo číslo kritérium	$Pr_{I,St}$	[1]	0,941	0,931
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_{I,St}$	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,518	0,522
Entalpie primárního média				
Entalpie primárního média – vstup	$i_{I,1}$	[kJ.kg ⁻¹]	1 519	1 501
Entalpie primárního média – výstup	$i_{I,2}$	[kJ.kg ⁻¹]	1 328	1 326
Entalpie sekundárního média				
Entalpie napájecí vody (t=220 °C)	i_{NV}	[kJ.kg ⁻¹]	943,5	943,5
Entalpie syté vody	i'	[kJ.kg ⁻¹]	1 307	1 270
Entalpie syté páry	i''	[kJ.kg ⁻¹]	2 762	2 772

Tab.: 3.8 Počet trubek a celková průtočná plocha primárního média

Název veličiny	Značka	Jednotka	PG VVER 1 500	PG VVER 1 200
Průtok I. média	m_I	[kg.s ⁻¹]	5 751,23	4 617,6
Celková teoretická průtočná plocha I. média	$S_{IC(t)}$	[m ²]	1,836	1,466
Průtočná plocha jedné trubky	S_{tr}	[m ²]	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$
Teoretický celkový počet trubek	n_{tr}	[1]	13 800	11 023
Skutečný celkový počet trubek zvýšený o10%	n_{tr}	[1]	15 180	12 125
Skutečná celková průtočná plocha	$S_{I,C}$	[m ²]	2,018	1,613
Skutečná střední rychlost proudění I. média při jeho střední teplotě	w_I	[m.s ⁻¹]	4,10	4,09

Tab.: 3.9 Součinitel přestupu tepla mezi primárním médiem a vnitřní stěnou trubky

Název veličiny	Značka	Jednotka	PG VVER 1 500	PG VVER 1 200
Reynoldsovo číslo	$Re_{I,St}$	[1]	445 894,12	444 565,21
Teplota syté páry (při tlaku 7,8 / 7,05 MPa)	t_{II}	[°C]	293,2	286,3
Teoretická střední teplota stěny trubky	$t_{trSt(t)}$	[°C]	303,9	299,65
Prandtlovo kritérium	Pr_{trSt}	[1]	0,8892	0,8745
Nusseltovo kritérium	$Nu_{I,St}$	[1]	685,96	682,56
Součinitel přestupu tepla na straně primárního média	α_I	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	27 327,59	27 402,16

Tab.: 3.10 Součinitel přestupu tepla mezi vnější stěnou trubky a sekundárním médiem

Název veličiny	Značka	Jednotka	PG VVER 1 500	PG VVER 1 200
Empirický vztah pro určení konstanty A použitý z literatury	A	[1]	9,357	8,746
Střední tepelný tok stěnou určený iterační metodou	$q_{St(t)}$	W.m ⁻²	98 728	145 503
Součinitel přestupu tepla na straně sekundárního média	α_{II}	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	29 325,26	35 960,17

Tab.: 3.11 Střední logaritmická teplota

Název veličiny	Značka	Jednotka	PG VVER 1 500	PG VVER 1 200
Teplotní rozdíl mezi vstupujícím I. médiem a II. médiem	Δt_1	[°C]	37,5	41,7
Teplotní rozdíl mezi vystupujícím I. médiem a II. médiem	Δt_2	[°C]	5,3	11,7
Střední logaritmický teplotní spád	Δt_{ln}	[°C]	16,5	23,6

Tab.: 3.12 Součinitel prostupu tepla

Název veličiny	Značka	Jednotka	PG VVER 1 500	PG VVER 1 200
Výsledný součinitel prostupu tepla mezi teplotní stěnou a parovodní směsí	k	[W. m ⁻² .K ⁻¹]	5 953,54	6 189,91
Měrný střední tepelný tok stěnou	q_{St}	[W.m ⁻²]	98 233,45	146 081,88
Relativní chyba volené hodnoty středního tepelného toku vzhledem k vypočtené hodnotě	Δq_{rel}	[%]	0,5	0,3
Odchylka v mezích tolerance do 1%			ano	ano

Tab.: 3.13 **Kontrola navržené teploty stěny**

Název veličiny	Značka	Jednotka	PG VVER 1 500	PG VVER 1 200
Teplo sdělené 1 m stěny trubky	q_{lSt}	$[W.m^{-1}]$	4 937,33	7 342,83
Povrchová teplota stěny trubky na straně I. média	$t_{trI.}$	$[^{\circ}C]$	310,18	306,44
Povrchová teplota stěny trubky na straně II. média	$t_{trII.}$	$[^{\circ}C]$	296,55	290,36
Střední teplota stěny trubky	t_{trSt}	$[^{\circ}C]$	303,37	298,40
Relativní chyba volené hodnoty střední teploty stěny trubky	Δt_{trRel}	$[\%]$	0,17	0,4
Odklon je v mezích tolerance do 1%		$[\%]$	ano	ano

Tab.: 3.14 **Velikost teplosměnné plochy a střední délka trubky**

Název veličiny	Značka	Jednotka	PG VVER 1 500	PG VVER 1 200
Celková teplosměnná plocha	S	$[m^2]$	11 070	5 476
Celková délka trubek PG	L_{trC}	$[m]$	220 230	108 941
Délka střední trubky	L_{tr}	$[m]$	14,5	8,98

Tab.: 3.15 **Parní a tepelný výkon PG**

Název veličiny	Značka	Jednotka	PG VVER 1 500	PG VVER 1 200
Výparné teplo vody	l_v	$[kJ.kg^{-1}]$	1 455	1 502
Parní výkon PG při teplotě napájecí vody 220°C	G	$[kg.s^{-1}]$	596,8	436,7
Skutečný tepelný výkon	Q_{PGsk}	$[kW]$	1 085 280,8	798 505,95
Kontrola tepelného výkonu vypočteného vzhledem tepelnému výpočtu zadanému	ΔQ_{PGrel}	$[\%]$	0,2	0,187
Odklon v mezích tolerance do 1%.		$[\%]$	ano	ano

4 Závěr

Tato bakalářská práce se na základě rešerše odborné literatury zabývá koncepcí vodorovných parních generátorů VVER 1 200 a VVER 1 500, u jaderných elektráren III. + generace. Stěžejní částí této práce je tepelný výpočet parního generátoru se čtyřsmýčkovým uspořádáním primárního okruhu pro VVER 1 500. Hodnoty pro tento výpočet byly předem určeny vedoucím práce. Mým cílem bylo porovnání hodnot tepelného výpočtu u obou typů generátorů. Pro tento účel jsem mimo tuto práci provedl také výpočet pro parní generátor VVER 1200. Vstupní hodnoty jsem stanovil sám na základě dostupných informací. Pro rychlou a přehlednou orientaci jsem tyto údaje zaznamenal v tabulkách.

Jelikož toto téma je poměrně nové, neexistuje k němu téměř žádná ucelenější literatura. Jde o systémy, které jsou v praxi jen krátce nebo teprve budou uváděny do provozu v nejbližších letech. Tyto parní generátory jsou určeny pro projekty III. a III. + generace jaderných reaktorů. Jedná se o několik variant nejmodernějších tlakovodních reaktorů moderovaných lehkou vodou (PWR). S reaktory tohoto typu se počítá i při dostavbě naší jaderné elektrárny Temelín. Společnost ČEZ koncem roku 2009 ukončila příjem žádostí o účast na výběrovém řízení na dostavbu JE Temelín a výstavbu dalších tří bloků. Podle odborníků připadá v úvahu trojice dodavatelů: ruský Atomstrojexport, francouzská Areva a americký Westinghouse.

Rusko-české konsorcium (Atomstrojexport, Škoda JS a Gidropress) nabízí modernizovaný reaktor III. generace MIR-1 200 (AES-2006). Nabídku doplňuje návrhem na pomoc s vybudováním nového závodu na zpracování jaderného paliva v České republice za přispění ruské státní společnosti Rossatom. Konsorcium počítá, že zařízení pro elektrárny bude ze 70 procent od tuzemských společností. V Rusku jsou ve výstavbě čtyři analogické energobloky v areálu Leningradské jaderné elektrárny, další dva v areálu Novovoronežské jaderné elektrárny. Atomstrojexport nyní nabízí reaktor ve Finsku, Turecku a Kaliningradské oblasti Ruské federace. Cenu odhaduje na čtyři miliardy eur. Pod označení AES-2006 (nyní MIR-1 200) se skrývá projekt odvozený od reaktorů typu VVER 1 000, jehož dva bloky jsou v současnosti provozovány v elektrárně Temelín. Jedná se o projekt tlakovodního reaktoru, který je licencován v Rusku. Počítá se s čistým elektrickým výkonem 1 113 MWe.[9]

Areva se do tendru hlásí s evropským reaktorem EPR o výkonu 1 600 + MWe. Firma v současné době staví čtyři reaktory tohoto typu – dva v Číně, po jednom ve Francii a ve Finsku. Nejdále je projekt reaktoru ve finském Oikiluoto, kde však dochází k nečekaným problémům. Podle původních předpokladů měl být reaktor spuštěn už v roce 2009, v současné době Areva uvádí termín 2012. Areva odhaduje náklady na 4,5 miliardy eur.

Americká firma Westinghouse, která se už podílela na dokončení prvních dvou bloků jaderné elektrárny Temelín, bude nabízet tlakovodní reaktor AP-1 000 o výkonu 1 200 MWe.

Tento projekt vychází z technologií ověřených 50 lety provozu a čerpá z mnoha zkušeností s provozováním desítek tlakovodních reaktorů firmy Westinghouse. Firma v případě vítězství počítá s tím, že nejméně 65 procent dodávek pokryjí tuzemské firmy. Licenci obdržel v USA v roce 2006. První dva reaktory tohoto typu začala firma stavět v Číně na konci roku 2008. Odhady nákladů na výstavbu obou reaktorů se pohybují od 5-5,5 miliardy dolarů.[9]

Důvody pro volbu PWR reaktoru byly především:

- Světová rozšířenost tlakovodních elektráren – tvoří téměř 60 % provozovaných jaderných elektráren ve světě,
- 50 lety provozu vyzkoušené a v návaznosti na současné bezpečnostní standardy zdokonalené projekty tzv. III. a III. + generace,
- Probíhající výstavba těchto projektů v Evropě i jinde ve světě,
- Provozní zkušenosti ČEZu s tímto typem elektráren – Dukovany a Temelín jsou II. generaci PWR,
- Výkon odpovídající optimálnímu využití současné lokality Temelín a potřebám České republiky do budoucích let včetně rozšířených možností regulace výkonu.[9]

V současné době dostanou firmy kompletní zadávací dokumentaci, na jejíž prostudování a vytvoření konkrétních nabídek mají čas do jara 2011. Pak bude probíhat posouzení z hlediska ceny, bezpečnosti a řady dalších parametrů. Po vyhodnocení všech rizik i výhod, které budou pro naši stranu vyplývat, dojde k samotnému podpisu smlouvy s vítězným dodavatelem. To by se mohlo odehrát na jaře roku 2012 a o rok později by se mohla rozjet samotná stavba.[9]

Jaderná technologie s tlakovodními energetickými reaktory PWR (VVER) je léty prověřená a považována za jednu z nejvyspělejších a nejspolehlivějších ve světě. Nové projekty pro dostavbu Temelína počítají ze spolupráci s českými firmami. Není to nic nového ani neobvyklého, protože na dobrém jménu technologie s tlakovodními reaktory, se z velké části již dříve podílela i naše země. Již od 70 let minulého století české firmy vyrábějí a dodávají na základě ruské projektové dokumentace komponenty primárních okruhů jaderných elektráren VVER včetně nového typu VVER 1200. Za všechny uvedu jeden příklad. Výrobu primárních kolektorů parních generátorů pro tento typ reaktoru již zkušebně zahájila firma Vítkovice, a.s. z Ostravy. Ta za tímto účelem provedla modernizaci ocelárny, ovládla technologii výroby oceli 10GN2MFA se zpřísněnými požadavky na obsah škodlivých prvků – zejména fosforu a síry. Tři zkušební kusy tělesa primárního kolektoru byly podrobeny zkouškám v Rusku i u nás. Všechny dopadly dobře a firma získala souhlas s výrobou nové modifikace oceli. Zda jsou české firmy schopny i nadále se ucházet o zakázky pro jadernou energetiku, odpověděl v listopadu 2009 pro časopis All for Power předseda představenstva a generální ředitel společnosti Vítkovice, a.s. Ing. Jan Světlík:

„ Velkým problémem je to, že se o jaderné energetice více hovoří, než koná. Nedělejme s jádra vědu a pojďme konečně do toho.“

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval prof. Ing. Pavlu Kolatovi, DrSc., za cenné připomínky a odborné rady, které mi poskytl během psaní mé bakalářské práce.

5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] < <http://www.simopt.cz/energyweb/web>>
článek: *Výlet do mikrosvěta*
- [2] < <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Fyzika&oldid=5196225>>
článek: *Jaderná elektrárna*
- [3] < <http://nc25.troja.mff.cuni.cz/~dolejsi/fkn/Kap4-34.ht>>
článek: *Jaderná elektrárna a její bezpečnost*
- [4] < http://webs.zcu.cz/fel/kev/CZV_ZEI/zei-vi.doc>
článek: *Výroba a rozvod elektrické energie-jaderná elektrárna*
- [5] < <http://www.trivis.info/view.php?cislocclanku=2005090912>>
článek: *Reaktorová sága do roku 2030*
- [6] < <http://www.osel.cz/popisek.php?popisek=8870&img=1209887023.jpg>>
článek: *Reaktory III. generace*
- [7] < http://www.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=27640>
článek: *Základy elektroinženýrství-Elektroenergetika*
- [8] < <http://www.unium.cz/materialy/vut/fekt/bvee-vyroba-elektricke-energie-p24609.html>>
slajdy z přednášky: *Výroba elektrické energie, Ing. P. Mastný Ph. D.*
- [9] < <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/jaderna-energetika/jaderne-elektřiny-cez/edu/technologie-a-zabezpečeni.html>>
článek: *Zvažovaná dostavba elektrárny Temelín*
- [10] HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren díl 2*. ČVUT Praha, 2005. ISBN 80-01-03189-6
- [11] BEČVÁŘ, Josef a kol. *Jaderné elektrárny*. 1. vyd. SNTL/ALFA Praha 1988. 634s. Celostátní vysokoškolská učebnice
- [12] HEŘMANSKÝ, Bedřich. *Jaderná zařízení I*. 2. vyd. ČVUT Praha 6, 1990. 185 s. ISBN 80-01-00405-8
- [13] Dragunov Yu., Ryzhov S., Mokhov , *Development of VVER 1200 reactor plant for NPP of (large series)*
novou sérii jaderných elektráren (2006)
- [14] Stanislav I. Antipov, Michail F. Rogov, Valery P. Novak –
Russia Rosenergoatom, *Nuclear power plant with VVER 1500 reactor*
- [15] Cerný, V., Janeba, B., Karták, J., Jirouš, F., Marvan, B.:
Základy konstruování kotlů a parogenerátoru jaderných elektráren,
ČVUT Praha, 1974
- [16] Janeba, B., Karták, J.: *Tepelné výpočty kotlů a parních generátoru*,
ČVUT Praha, 1982
- [17] Kadlec, Z.: *Sdílení tepla*, SPBI, 2006